



## Checking Capacity for MIMO Configurations MIMO

Thaysen, Jesper; Jakobsen, Kaj Bjarne

*Published in:*  
Electronic Systems Design

*Publication date:*  
2007

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Thaysen, J., & Jakobsen, K. B. (2007). Checking Capacity for MIMO Configurations: MIMO. *Electronic Systems Design*.

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

global sources

# 电子系统设计

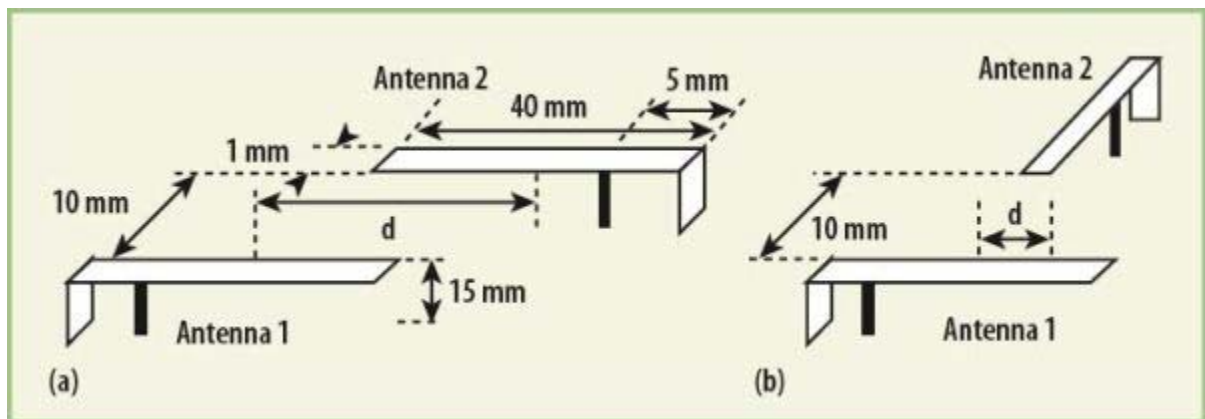
欲打印此文章，从您的浏览器菜单中选择“文件”后再选“打印”。

## MIMO系统容量的计算方法

上网时间：2007-11-06

用于多输入多输出结构的天线单元会影响无线通信系统的容量并能对抗多径效应。提高性能的一个关键是为系统方案寻找MIMO使得无需增加天线单元，只优化现有天线就能达到目的。

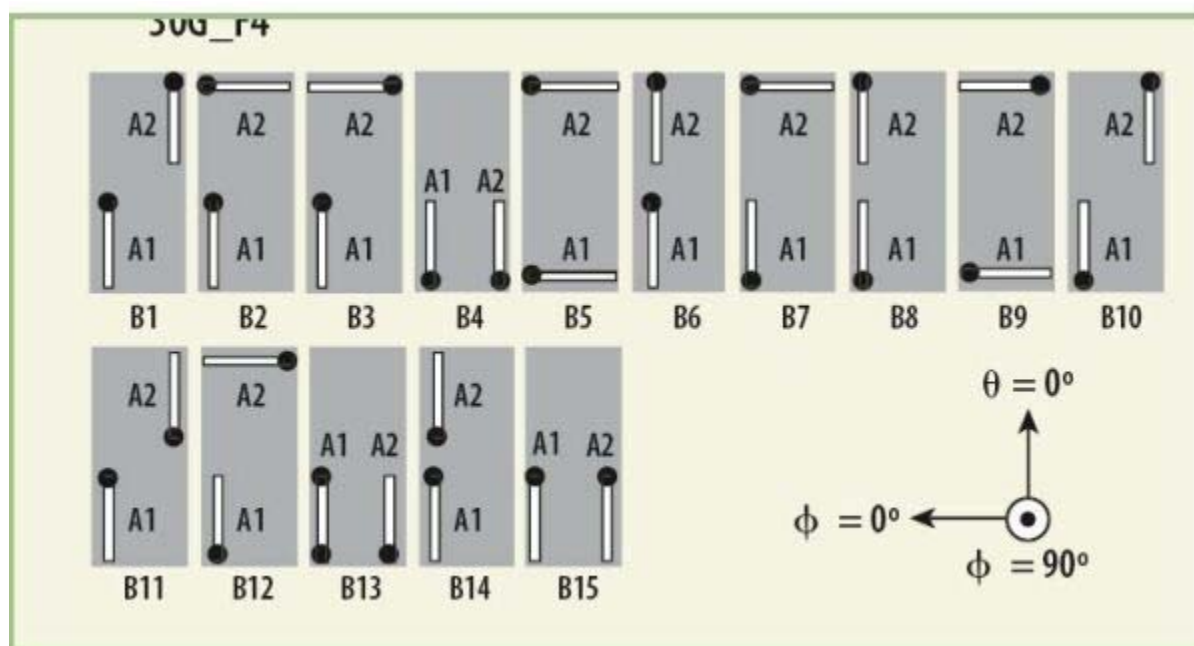
Thaysen等人描述了互方向、位置以及互耦对在无限大地平面上两个相同天线间包络互相关性的影响，为确定包络相关与固定方向关系以及互耦合同固定距离时天线方向旋转的关系，他们还研究了使用两个彼此靠近，在同一地平面的相同PIFA时的对称和非对称情况，其结果(使用IE3D仿真软件仿真)阐明了如何确定天线指向与位置来使包络相关最小。研究了两种不同情形：一种是使用平行天线，一种是天线间具有垂直关系，如图1所示(水平距离 $d$ 的定义使得图1a的情形中， $d$ 为正值。)对于平行情况(图1a)，天线间距为10毫米相关系数是 $pe=0.8$ ，把其中一副天线简单地旋转180度，包络相关系数就降低到 $pe=0.4$ 。类似结果对于垂直天线结构(图1b)也能使包络相关系数从 $pe=0.5$ 下降到 $pe=0.25$ 。在垂直结构中，当开路端与馈线垂直时包络相关系数最大。



研究者们发现在平行天线情况下中心频率偏移( $|S_{11}|$ 最小)受影响最大，每副天线在相同端都有馈入点，可观察到12%的频偏变化PIFA单元相比，另一种情形(两副天线互相垂直情况)变化量低于2%。平行结构的最大包络相关系数是 $pe=0.8$ ，当天线彼此交叠且均在一端的情况下包络相关系数取得最大值。

此外，可发现互耦与包络相关系数几乎呈指数关系。研究发现，互耦极限为-10dB，在该极限以下，包络相关系数几乎为恒定值， $pe=0.15$ ，因此，降低互耦的努力将受限于此水平。

把天线置于有限平面会影响其性能。图2给出的设计，是按照平面倒F天线(PIFA)的输入阻抗和带宽来优化天线(即改变馈入点跟至离，这取决于PIFA在地平面的位置)。对一些性能参数(相关性和带宽)组合优化可选出最佳天线结构。不过，移动电话的外盖、人的邻近效应也应包括进分析当中。这样，当把外盖、手、头的影响考虑进来时，最优结构的结果就可能稍有不同。



在MIMO应用中，低包络相关是必要的，天线位置和方向不仅要根据包络相关性，还要根据带宽来优化。已发现对于二元天线结构位置和方向对于MIMO性能，即带宽和天线间的包络相关，并不是获得最低包络相关性的必要因素。某种带宽也是必需的。把包络带宽同时考虑进来，就会发现B4结构形式能给出最佳性能。这里频带以1.79GHz为中心，其宽度为为中心频率的12.2%；包络相关0.1，最强互耦为-7.7dB。

从Thaysen等人研究的十五种不同双天线结构来看，包络相关性与互耦之间的关系显示出低互耦会带来低包络相关性。不过，低互耦并非必然因为低互耦，还有，可观察到低互耦会导致低带宽，这主要是这些结构中天线的阻抗匹配不好引起(高反射系数)。产生这些结构也会带来高带宽。Thaysen等人断定高耦合会降低对优化结构的自由选择范围。

考虑到增加的复杂性，相对于添加额外天线单元，则对给定数目的天线单元进行细致优化有可能列为首选。在参考文献6里，对MIMO性能评估完全基于天线性能，如包络相关性、互耦、谐振频率、带宽和天线辐射效率，其中包络相关性和带宽特别受关注。然而，MIMO优势应当是提高容量，因此，该对容量做出评估。为得到全部好处，也应该评估多径环境下的容量。

计算MIMO系统的容量需要知晓传播环境和天线结构的信息。对MIMO天线结构的现实评价要求在MIMO天线结构下进行多单元传到多单元传播测量的一种方法是表征出真实散射环境下的实际原型。然而这是一个非常耗时的过程。此外，整个测量都必须针对案例反复进行。

Thaysen等人提出基于MIMO天线性能评估的测量方法。给出的结果融合了采用MIMO耦合矩阵测试时的天线复杂辐射模式。MIMO代表在赫尔辛基市区测得的一个小型宏单元MIMO环境(例如，见参考文献39的地图)。MIMO耦合矩阵由赫尔辛基技术大学Vainikunnen小组测量得到。

通过这些多单元传播测量方法可以得到天线单元辐射模式下测得的传播路径组合。不过，这要求提取全双向传播信道参数。测量线性发射天线阵和球形接收天线阵，构成信道探测器用来测量无线信道的空间和时间特征，天线阵均采用双极化转接天线。

发射天线阵由八个定向双极化天线单元组成，它们彼此相距半个波长(0.5λ)，对测量数据进行后处理时要从天线阵选出不同数目自发射功率被限制到+26dBm。球形接收天线阵由32个单元组成，每个单元都跟发射天线阵的天线单元相似。位于球面的单元被用移动站。一个双极化单元由两个正交的通道组成，即与极化馈接。入射角测量的均方根(RMS)误差大致为1度。该测量系统最初是为开发的，但被扩展到MIMO测量。

基站信号与接收端移动台信号通过矩阵H相关联，矩阵H代表多径环境中在某个时刻以及天线空间位置的传输关系，表示为：

$$y(t) = H(t)s(t)$$

这里y(t)是基站传输信号，可表示为：

$$\mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)]^T$$

$\mathbf{s}(t)$ 则是移动台接收信号:

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T$$

矩阵 $\mathbf{H}$ 从下式得到:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \cdots & \alpha_{1,n} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} & \cdots & \alpha_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{m,1} & \alpha_{m,2} & \cdots & \alpha_{m,n} \end{bmatrix}$$

这里 $\alpha_{i,j}$ 是从天线 $i$ 到天线 $j$ 的复传输系数。

这些结果仅限于频率扁平衰落信道, 因此相应的输入输出关系可被简化成 $\mathbf{B}=\mathbf{H}(\mathbf{t})\mathbf{A}$ , 这里 $\mathbf{H}$ 是窄带矩阵, 它描述了多径环境中在经线空间位置的MIMO天线系统从第 $m$ 个发射天线到第 $n$ 个接收天线的复杂信道。联合测量得到的天线辐射模式和测量得到的MIMO计算出MIMO系统容量。为计算容量, 测量值必须是单个天线单元的辐射模式, 这时仍需考虑其它所有单元的存在(但需要端接表源阻抗的负载)。文献8中, 复杂辐射模式在屏蔽室测量得到。分别在自由空间和更接近实际情况的环境下进行各种测量, 更接近环境即指天线贴近假手和头部来确定近似的效果。为了使MIMO评估获得尽量真实的结果, 结果包括测量的宏单元MIMO环境, 并究的MIMO系统天线的辐射模式。

在SISO系统中, 只有一个发射通道, 用作数据传输的传统信道的香农容量是:

$$C = \log_2(1 + \text{SNR}) \quad [\text{bit/s/Hz}]$$

这里, SNR是信号噪声比。在未知信道特征的条件下, 分配发射功率的最好办法是把功率平均分配给所有的发射天线单元。在均匀分配功率的条件下, 这样一个MIMO系统的容量定义为:

$$C = \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{\text{SNR}}{m} \mathbf{H} \mathbf{H}^* \right) \right] \quad [\text{bit/s/Hz}]$$

这里 $\mathbf{I}$ 是单位矩阵、 $(*)$ 表示共轭转置、 $\mathbf{H}$ 是MIMO系统信道矩阵。

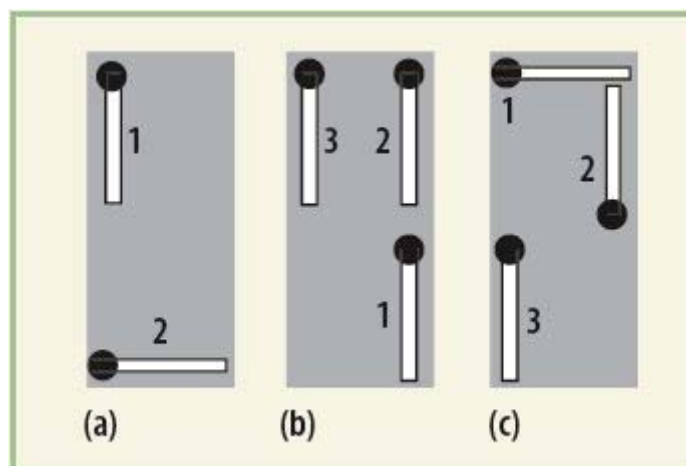
已经证明, 当 $m=\min(M, N)$ 时等式6中的容量会线性增长, 而不是像分集情况那样呈对数增长。

容量公式在窄带假定下有效, 即假定为频率扁平衰落MIMO信道。如果信道是频率选择性的, 矩阵 $\mathbf{H}$ 依赖于频率, 这种情形下, 应输带宽内作积分来计算此种情况的容量。

假定发射信道已知, 信号传输按照优化信道容量的方式被分配到所有传输天线。总发射功率分配让那些有更高增益的信道获得更有较小增益的信道获得较少功率甚至没有功率。这种技术被称作注水法。

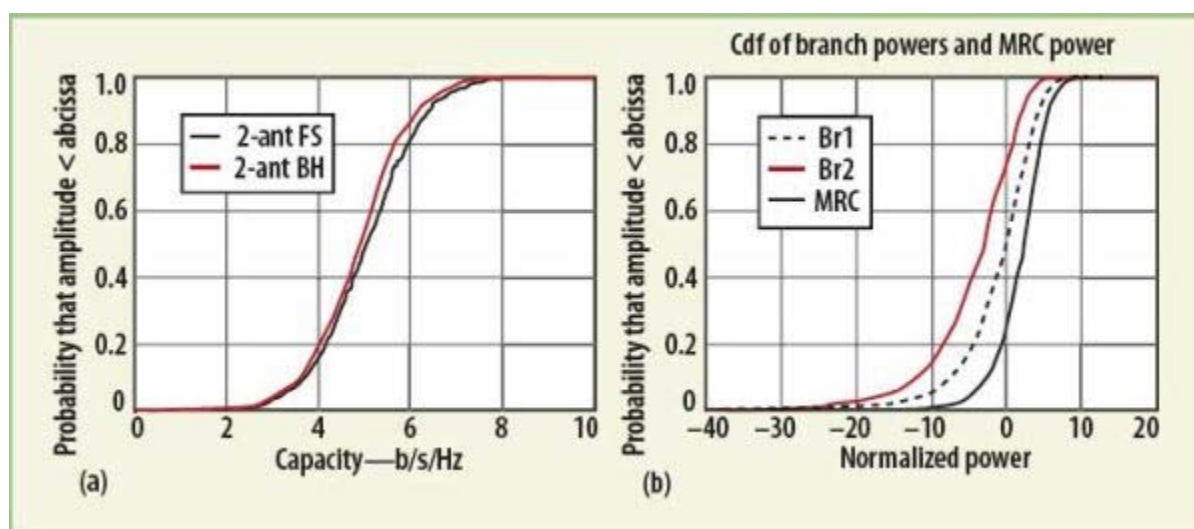
对于已知MIMO全部特征的发射机, 最大可得容量与注水法相当。实际当中, 由于信道的时间选择性, 延迟或缺少来自接收机的到的特征可能只有一部分。不过, 即便利用这些不完全特征, 同没有任何先验知识的信道比起来, 也可以得到明显改善。比起在均匀分配功率的方案, 注水法有着明显的优势。信噪比低时, 注水技术搜索 $\mathbf{H}$ 矩阵的最大特征值, 并通过一种单一模式(信道)发当信噪比为中间值时, 较功率均匀分配方案注水法仍然可以改善容量。不过, 这种优势会随着信噪比增加而下降。在SNR为中间技术使用L形天线阵, 这里1

文献8给出了三种简单但合乎实际的二元和三元天线结构(图3)的容量和分集增益。信道数据在赫尔辛基市区的小宏单元环境下测得。这些结果对自由空间辐射模式和说话位置(即假手和假头一旁)辐射模式都适合。文献8中,发射机对信道未知,因此采用等功率分配量,即利用等式6。



用自由空间辐射模式计算,在(2, 2)系统中,所提出的二元天线结构(见图3a)会产生50%的减量信道容量 $C_{0.5}$ ,其值为5.0b/s/Hz。到,在假手和假头一旁的说话位置,此辐射模式下容量有0.1b/s/Hz的轻微下降。这种差异来自天线1和天线2总效率峰值之比,距结果相比,该比值要略低。两种情形下,平均接收SNR都选择为10dB。

使用多于一付天线获得的增益是经过最大比率结合(MRC)之后的功率与更强分支功率( $Br_1$ 与天线1有关,  $Br_2$ 与天线2有关)之差,该结果受分支功率差影响严重。如图4b所示, MRC为4.8dB高于 $Br_1$ 。在50%的概率水平 $p$ ,  $Br_1$ 与 $Br_2$ 之间的差( $\Delta_{Br_2-Br_1}$ )是2.8dB。测量得到的总效率时,天线1的分支功率最大的事实看起来很合理,因为天线1有着最高的总效率。



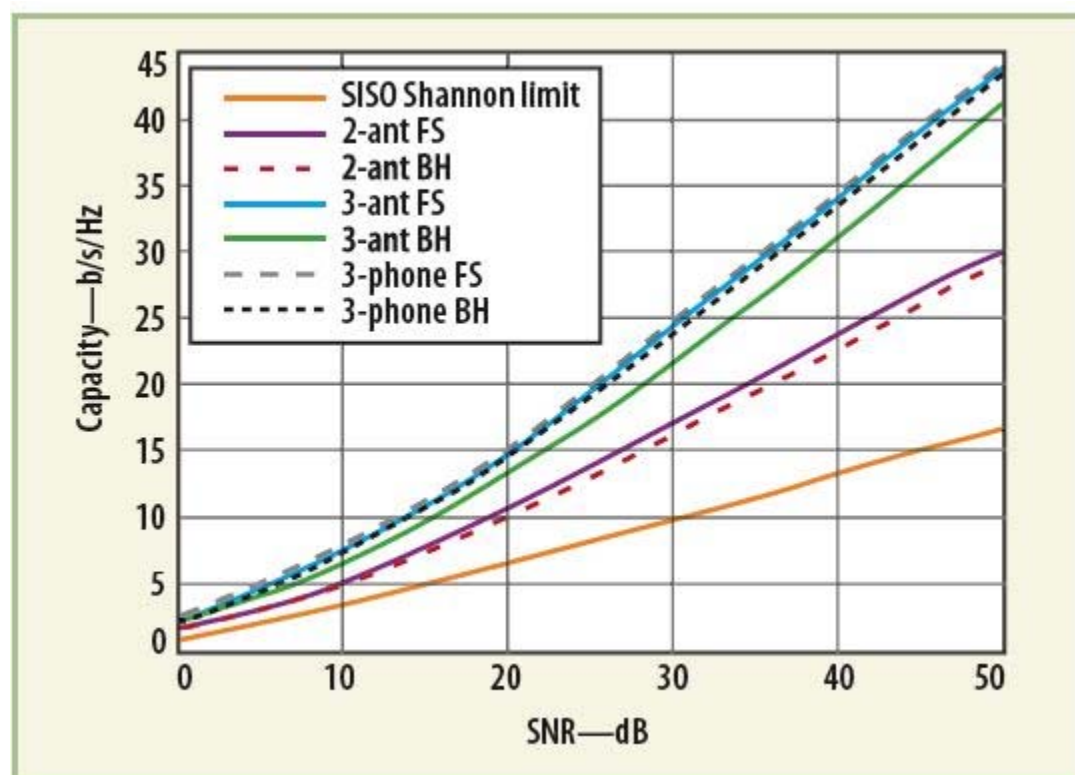
三元天线结构,即(3, 3)MIMO系统,使用自由空间辐射模式,其50%减量信道容量 $C_{0.5}$ 是7.1b/s/Hz(图3b)。即使天线2的分支功率 $Br_2$ 比 $Br_1$ 低, MRC16.8dB,同(2, 2)MIMO结构相比,其对容量的改善也有1.5b/s/Hz。通过设计多天线系统使得不同天线的效率在一定程度上足够使容量进一步得到优化。当把这些天线安装到移动电话中后(图3c),可以观察到相同的趋势。当把天线整合到一部手机中时,自由空间辐射效率大致低于20%,该事实并不影响自由空间容量,仍然保持为7.1b/s/Hz。这是因为,在自由空间测得的峰值总效率之保持不变。

当三副天线被整合到一部电话里时,把天线放到假手和假头附近,在1.7~1.9GHz的范围内测得的辐射效率在4%到14%之间。平均安装在地平面的三元天线结构的效率要低。但由于天线2非常低的辐射效率(低于2%),天线单元之间的效率比也减少了,这样容量为0.5b/s/Hz,高于三元天线结构,该结构没有安装到手机中。

容量与天线单元数量之间在理论上的线性关系得到Thayssen等人的实验验证,这种关系在早期关于MIMO的研究工作中也得到推



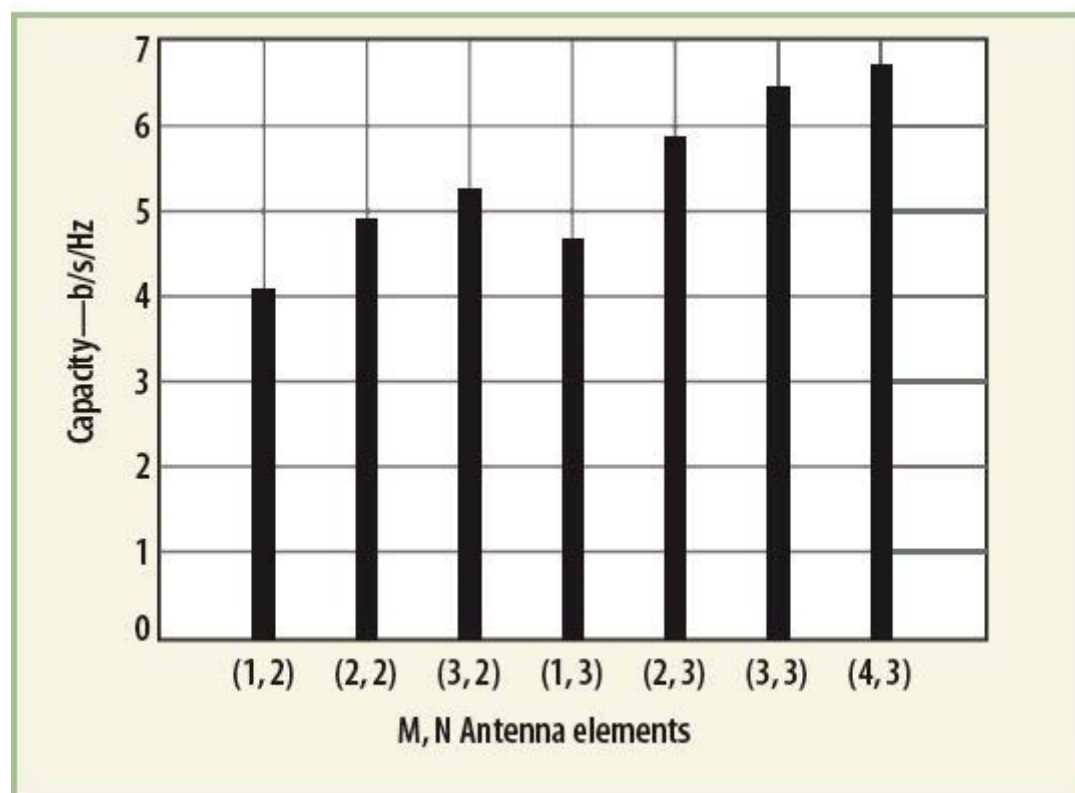
噪比增加而增加(图5)。在低信噪比时(即低于5dB),使用三元天线的容量跟使用二元天线的容量差异很小;当SNR=0dB时,差异0.5b/s/Hz;说话位置模式下的容量为1.6b/s/Hz,这是最低值。用SNR为50dB时额外天线获得的增益达到说话位置模式43b/s/Hz比二元天线结构下可获得的容量高出14b/s/Hz。SNR为50dB时,SISO系统容量的香农极限为16.6b/s/Hz,这大约是(2,2)系统是(3,3)MIMO系统容量的三分之一。类似关系可以在文献3,5,9中找到。



MIMO系统基于两个或更多子信道以相同带宽同时传输数据。Thaysen等人针对这里采用的三种不同结构,讨论了增加传输单元的影响。在发射天线结构中简单地增加更多单元,容量会得到增加。对于Thaysen等提出的二元天线结构,说话位置模式的容量从1.6b/s/Hz增加到完整(2,2)MIMO系统时的4.9b/s/Hz。对三个发射单元,两个接收单元(3,2)的情况,容量达到5.2b/s/Hz,额外的发射天线会带来额外0.3b/s/Hz容量的增长。对于安装在手机内部的三元天线结构,当发射天线数量从1增加到7时,说话位置模式的容量从4.7b/s/Hz增加到8.2b/s/Hz。超过4个发射天线,总容量的增加会小于每副天线所带来的增长之和,这跟发射单元数小于3时不同。从发射天线到四副发射天线,说话位置模式的容量从4.7增加到7.4b/s/Hz,相当于最后三副天线每一副带来0.8b/s/Hz的增加。最明显的一副天线增加到两副,即从(1,3)改变到(2,3)MIMO系统。应当记住, $m=\min(M, N)$ 时容量呈线性增长,而在分集情况下则是呈对数增长跟理论是一致的。Sulonen等人曾得出类似的关系。

最近,Molisch等人演示了一种考虑简单分集的MIMO系统,即在链路一端或双端进行分集的情况。这种结构使用源自(N,N)MIMO天线单元,该方法产生出一种简化的MIMO系统,其复杂度相对于完整(N,N)MIMO系统也得到简化。其中,Vaughan指出发射或接收天线可改善链路质量。

Lebrun等建议用两种办法降低复杂度,其中一种基于SNR,另外一种基于信号强度。Lebrun等人给出的结果基于采用注水法的文献8里,容量是在发射端对信道未知的假定下计算得到的,而且假定功率均匀分配到各天线。增加额外天线会增加容量,不过,单元性能下降,因为天线单元间的距离减少了。这样一来,跟理论上容量提高相比,额外天线单元带来的好处可能会减少,所以在天线单元数、容量和MIMO系统复杂度之间要有一个折中。考虑复杂度降低,相对于增加天线单元,则首选细致优化给定数量的天线单元。图6显示了二元天线与三元天线结构中发射单元数目不同时容量。



Thaysen等人还研究了接收方与发射方天线数量不同时简化MIMO系统的影响。他们推断，从容量的角度来看，比较(1, 3)发射分集(容量为4.7b/s/Hz)而言，最好采用完整(2,2)MIMO系统(容量为4.9b/s/Hz)。他们认识到，比起增加额外发射天线(3, 2)，最好采用额外接收天线即(Tx, Rx)=(2, 3)。接收分集设置具有5.8b/s/Hz的容量，这比发射分集结构高出0.6b/s/Hz。该结论跟Foschini等人给出的结果是一致的。对于已知信道，接收分集结构会给出与发射分集结构相同的容量。须牢记，MIMO系统的硬件复杂度随着天线数量的增加而增加。所以，以用作一种简单方法来增加MIMO天线结构的容量，而使硬件复杂度提高最少。

## 致谢

本研究受到丹麦诺基亚公司的赞助。作者要感谢丹麦技术大学的Elna S rensen校阅本文；还要感谢赫尔辛基诺基亚研究中心的K Kalliola，赫尔辛基技术大学的Pasi Suvikunnen和Petri Vainikainen博士，奥尔堡大学的J'rgen Bach Andersen博士，以及丹麦技术大学Erik Bruun博士诸位对本文所作颇有价值的评论。

## 参考资料

参考资料1~36见[www.mwrf.com/Articles/Index.cfm?ArticleID=15565&pg=3](http://www.mwrf.com/Articles/Index.cfm?ArticleID=15565&pg=3)

37. Internet: [www.zeland.com](http://www.zeland.com).

38. A.F. Molisch and M.Z. Win, "MIMO systems with antenna selection," Microwave Magazine, IEEE, Vol. 5, No. 1, pp. 46-56, 2003.

39. K. Sulonen, P. Suvikunnas, J. Kivinen, L. Vuokko, and P. Vainikainen, "Study of different mechanisms providing gain in MIMO systems," Proceedings of the IEEE 58th Vehicular Technology Conference, 2003.

40. P. Suvikunnas, K. Sulonen, J. Villanen, C. Icheln, J. Ollikainen, and P. Vainikainen, "Evaluation of performance of multi-antenna terminals using two approaches," Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology, IMTC 2004, pp. 6, Italy, 2004.

41. K. Kalliola, H. Laitinen, K. Sulonen, L. Vuokko, and P. Vainikainen, "Directional Radio Channel Measurements as Mobile Station in Different Radio Environments at 2.15 GHz," 4th European Personal Mobile Communications 2001 -Conference, Austria, 2001.

42. J. Kivinen, P. Suvikunnas, D. Perez, C. Herrero, K. Kalliola, and P. Vainikainen, "Characterization system for MIMO channels," Proceedings of the 4th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2001, pp. 159-162.

43. K. Kalliola, H. Laitinen, L. Vaskelainen, and P. Vainikainen, "Real-time 3-D spatial-temporal dualpolarised measurement of radio channel at mobile station," IEEE Transactions on Instruments and Measurements, Vol. 49, pp. 439-448, 2000.
44. K. Sulonen, P. Suvikunnas, L. Vuokko, J. Kivinen, and P. Vainikainen, "Comparison of MIMO antenna configurations in picocell environments," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special issue on MIMO systems and Applications, No. 5, pp. 703712, 2003.
45. K. Kalliola, H. Laitinen, L. Vaskelainen, and P. Vainikainen, "Real-time 3-D spatial-temporal dual-polarized measurement of radio channel at mobile channel," IEEE Transactions on Instruments and Measurements, Vol. 49, pp. 439-446, April 2000.
46. J. Kivinen, P. Suvikunnas, D. Perez, C. Herrero, K. Kalliola, P. Vainikainen, "Characterization system for MIMO channels," in Proceedings of the 4th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Aalborg, Denmark, 2001, pp. 1-5.
47. C.E. Shannon, "A mathematical theory of communications: Parts I and II," Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379-656, 1948.
48. R.G. Vaughan, "Signals in Mobile Communications: A Review," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 35, pp. 1-1986.
49. G. Lebrun, S. Spiteri, and M. Falkner, "MIMO complexity reduction through antenna selection," Proceedings of the Australia Telecommunication Cooperative Research Center, ANNAC '03, pp. 5, 2003.

作者: Kaj B. Jakobsen

副教授

Email: kbj@oersted.dtu.dk

Technical University of Denmark

Jesper Thaysen 博士

Email: jesper.thaysen@nokia.com

Nokia 公司

此文章源自《电子系统设计》网站:

[http://www.ed-china.com/ART\\_8800023381\\_400010\\_500003\\_TS\\_c79e52a7.HTM](http://www.ed-china.com/ART_8800023381_400010_500003_TS_c79e52a7.HTM)

[返回文章页](#) | [返回主页](#)

[返回页首](#)

**eMedia Asia:** [电子工程专辑](#) | [手机设计](#) | [媒体播放器](#) | [汽车电子设计](#) | [工业控制](#) | [电源系统](#) | [模拟混合信号](#) | [家庭娱乐系统](#) | [商情](#)

**环球资源:** [环球资源企业网](#) | [环球资源内贸网](#) | [世界经理人](#) | [尚品人生](#) | [Electronic Components](#) | [Computer Products](#) | [Sourcing Fairs](#)

[RSS新闻聚合](#)  | [意见反馈](#) | [网站导航](#) | [帮助](#) | [关于我们](#) | [隐私政策](#) | [联系我们](#) | [使用条款](#) | [安全承诺](#) | [网址推荐](#)

Copyright © 2007 eMedia Asia Ltd. 本网站所有内容均受版权保护。

未经版权所有人明确的书面许可, 不得以任何方式或媒体翻印或转载本网站的部分或全部内容。